

УДК 681.513.5:622.24.205.055

## **АНАЛІЗ МУЛЬТИКОЛІНЕАРНОСТІ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДОЛОТАМИ ТИПУ PDC**

**О.В. Гутак**

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067  
e-mail: kafatp@ukr.net*

*Розглядається вплив функції зносу озброєння доліт типу PDC на проходку долота, механічну швидкість проходки, рейсову швидкість і собівартість метра проходки нафтових і газових свердловин. На базі аналізу необхідних умов існування екстремумів цих критеріїв показано, що для доліт типу PDC всі оптимальні режими збігаються.*

Ключові слова: критеріїв оптимальності, аналіз, мультиколінеарність, процес буріння, долото типу PDC

*Рассматривается влияние функции износа вооружения долот типа PDC на проходку долота, механическую скорость проходки, рейсовую скорость и себестоимость метра проходки нефтяных и газовых скважин. На базе анализа необходимых условий существования экстремумов этих критериев показано, что для долот типа PDC все оптимальные режимы совпадают.*

Ключевые слова: критерии оптимальности, анализ, мультиколлинеарность, процесс бурения, долото типа PDC

*Influence of function wear of armament of chisels is examined as PDC on driving of chisel, mechanical speed of driving, trip speed and prime price of meter of driving of oil and gas mining holes. It is rotined on the base of analysis of necessary terms of existence of extremums of these criteria, that for chisels as PDC all optimum modes coincide.*

Keywords: criterion of optimality, analysis, multikolinearost, processes of drilling, chisels PDC

Алгоритм оптимального керування процесом буріння, побудований на базі математичної моделі керованого об'єкта, передбачає наявність критерію оптимальності. Для буріння нафтових і газових свердловин традиційними шарошковими долотами основними критеріями оптимальності є критерій собівартості метра проходки, максимуму проходки на долото та критерій максимуму рейсової швидкості, які досліджені досить глибоко [1, 2].

Слід зазначити, що на даний час співвідношення між обсягами буріння традиційними шарошковими і сучасними долотами типу PDC (Polycrystalline Diamond Cutter) становить приблизно 75% і 25% відповідно. Проте, найближчим часом становитиме 50% на 50% [2, 3]. Це викликано тим, що конструкція цього типу доліт забезпечує тривалий ресурс експлуатації і великі швидкості буріння за рахунок високої зносостійкості ріжучих елементів PDC-різців, відсутність підшипникової опори, що підвищує проходку на долото і суттєво зменшує кількість опускально-підіймальних операцій. Окрім того, незначний вплив динаміки роботи долота на вибій свердловини і колону бурильних труб та висока зносостійкість різців калібруючої поверхні виключають необхідність проробки і калібрування стовбура свердловини перед опусканням обсадної колони [3,4].

Питання аналізу впливу зношування оснащення доліт типу PDC на оптимальні значення керувальних дій є актуальним науковим і прикладним завданням у зв'язку з широким застосуванням в бурінні комп'ютерно-інтегрованих технологій і збільшенням обсягів пошуково-розвідувального буріння.

З існуючих наукових досліджень [1,2,4,6 та ін.] відомо, що основна увага приділяється критеріям оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин традиційними шарошковими долотами, коли суттєвий вплив на критерій має ступінь зношування долота і час, що витрачається на опускально-підіймальні операції. Дійсно, протягом рейсу здійснюється 100÷300 однотипних з'єднувань і роз'єднувань бурильного інструменту. Отже, оптимальне регулювання роботи доліт нового покоління вимагає обґрунтування і подальшого розвитку критеріїв оптимальності для основного періоду роботи цього типу доліт.

Проте, аналіз літературних джерел [1, 2, 3, 4, 5 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку встановлення критеріїв оптимальності для процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами нового покоління типу PDC.

Метою даної роботи є аналіз впливу функції зношування оснащення доліт типу PDC на відомі критерії оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин.

Виходитимемо з того, що у процесі буріння свердловин різної глибини і призначення традиційними шарошковими долотами керувальні дії, що є оптимальними за якимось одним чинником, не є оптимальними за іншим, тобто екстремуми їх не збігаються.

Наприклад, максимум механічної швидкості проходки не збігається з максимумом проходки долота; мінімум собівартості метра проходки свердловини не відповідає максимуму рейсової швидкості [1, 5], навпаки, максимум проходки долота співпадає з мінімумом пито-

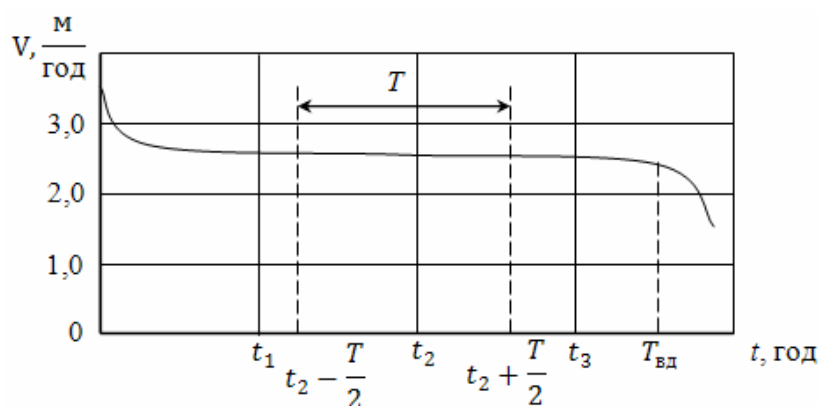


Рисунок 1 – Графік зміни оцінки математичного сподівання механічної швидкості проходки в часі

мих витрат електроенергії. Аналіз свідчить [1], що керування процесом буріння вести за одним критерієм недоцільно. Тому запропоновано було із збільшенням глибини свердловини для буріння традиційними шарошковими долотами почергово використовувати критерії оптимальності в певній послідовності за таким правилом:

$$\begin{aligned} P: V_p(x) \xrightarrow{x \in S} \max; \quad c(x) \xrightarrow{x \in S} \min; \\ P: h_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max, \end{aligned} \quad (1)$$

де:

$$S = \left\{ (F_i n_i)_{i=1,2,\dots,N}; F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}; \right. \\ \left. n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; \sum_{i=1}^N h_i = H; h_i > 0 \right\};$$

$V_p$  – рейсова швидкість буріння,

$c$  – собівартість метра проходки,

$F_i, n_i$  – осьова сила на долото і швидкість його обертання у  $i$ -му рейсі,

$N$  – кількість рейсів долота,

$h_i$  – проходка на долото в  $i$ -му рейсі,

$H$  – проектна глибина свердловини.

Для вибору критеріїв оптимальності у відповідності з правилом (1) в роботі [1] сформульовано спеціальне Т-правило. Проте, усі критерії оптимальності процесу буріння  $I(h(t), t)$ , де  $h(t)$  – проходка на долото,  $t$  – час буріння, залежать або від функції зношування долота, або від похідної функції зношування. Наприклад, такий інтегральний показник, як проходка долота може бути виражена наступним чином

$$h(\bar{U}, t) = V_0(\bar{U}) \cdot \psi(\bar{U}, t), \quad (2)$$

де:  $\bar{U}^T = (F, n)$  – вектор керувальних дій,

$V_0(\bar{U})$  – початкове значення механічної швидкості проходки незатупленим долотом,

$\psi(\bar{U}, t)$  – функція зношування оснащення долота, яка дорівнює відношенню початкової механічної швидкості проходки до початкового значення механічної швидкості проходки  $\phi = V/V_0$ . Тоді механічна швидкість проходки дорівнює

$$\frac{dh}{dt} = V(\bar{U}, t) = V_0(\bar{U}) \frac{d\psi(\bar{U}, t)}{dt}. \quad (3)$$

У процесі буріння долотом типу PDC, що не затуплюється, оцінка математичного сподівання механічної швидкості проходки не змінюється в часі, тобто

$$V = V(\bar{U}), \quad (4)$$

а функція зношування є часом  $T_{\text{вд}}$  відпрацювання долота

$$\psi(\bar{U}, t) = T_{\text{вд}}(\bar{U}). \quad (5)$$

Оскільки можна підібрати деяке значення часу  $T$ , протягом якого відбувається процес буріння в однорідних за міцністю породах, а саме  $|0 < T < \infty|$ , і для якого виконується умова

$$\int_{t_2 - \frac{T}{2}}^{t_2 + \frac{T}{2}} V(\phi) d\phi = \text{const}, \quad (6)$$

то такий режим буріння є усталеним (рис. 1).

Отже в усталеному режимі буріння постійним є математичне сподівання механічної швидкості проходки на інтервалі часу тривалістю  $T$ , який відповідає бурінню з постійними керувальними діями в породах однакової міцності. Такий режим роботи є стаціонарним, або статичним, що дає змогу використовувати для його оптимізації статичні методи оптимального керування.

Зважаючи на (5), проходка на долото типу PDC дорівнюватиме

$$h_d = V(\bar{U}) \cdot T_{\text{вд}}(\bar{U}). \quad (7)$$

Для ілюстрації того, що екстремуми функцій (2) і (3) збігаються під час буріння долотами типу PDC, визначимо необхідні умови максимуму механічної швидкості проходки.

$$\frac{\partial V(\bar{U})}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial n} = 0, \quad (8)$$

і максимуму проходки на долото

$$\frac{\partial h_d}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial h_d}{\partial n} = 0. \quad (9)$$

Після підстановки в систему рівнянь (9) виразу (7), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(V(\bar{U}) \cdot T_{\text{вд}}(\bar{U}))}{\partial F} &= \\ &= \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial F} T_{\text{вд}}(\bar{U}) + V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\text{вд}}(\bar{U})}{\partial F} = 0; \\ \frac{\partial(V(\bar{U}) \cdot T_{\text{вд}}(\bar{U}))}{\partial n} &= \\ &= \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial n} T_{\text{вд}}(\bar{U}) + V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\text{вд}}(\bar{U})}{\partial n} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналіз систем рівнянь (8) і (10) свідчить, що їх розв'язки ніколи не збігаються, оскільки, в системі рівнянь (10) наявна похідна від функції зношування, яка в процесі буріння традиційними шарошковими долотами весь час змінюється. Проте, оскільки для доліт нового покоління, що не затуплюються зокрема типу PDC, функція зношування постійна, то складові рівнянь системи (10) дорівнюють

$$V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\text{вд}}(\bar{U})}{\partial F} = 0 \text{ і } V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\text{вд}}(\bar{U})}{\partial n} = 0. \quad \text{Тоді}$$

система рівнянь (10) набуде такого вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial F} T_{\text{вд}}(\bar{U}) &= 0, \\ \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial n} T_{\text{вд}}(\bar{U}) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Отже, порівнявши системи рівнянь (11) і (8), бачимо, що екстремуми механічної швидкості проходки і проходки на долото типу PDC збігаються. Це означає, що керування процесом буріння можна здійснювати на базі критеріїв

$$h_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee V_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max. \quad (12)$$

Тепер розглянемо показник рейсової швидкості проходки долотами типу PDC

$$V_p = \frac{h}{t_{\text{б}} + t_{\text{спо}}}, \quad (13)$$

де:  $t_{\text{б}}$  – час чистого буріння,  
 $t_{\text{спо}}$  – час, що витрачається на спуско-підймальні операції.

Враховуючи, що  $h = V \cdot T_{\text{вд}}$  і  $t_{\text{б}} = T_{\text{вд}}$ , отримаємо

$$V_p = \frac{V \cdot T_{\text{вд}}}{T_{\text{вд}} + t_{\text{спо}}}, \quad (14)$$

тобто рейсова швидкість проходки долотами типу PDC залежить від механічної швидкості проходки  $V(\bar{U})$  і функції зношування долота  $T_{\text{вд}}(\bar{U})$ .

Необхідні умови існування екстремуму рейсової швидкості проходки

$$\frac{\partial V_p(\bar{U})}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial V_p(\bar{U})}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

у цьому випадку дають таку систему рівнянь [5]:

$$\begin{aligned} (T_{\text{вд}}^2 + T_{\text{вд}} \cdot t_{\text{спо}}) \frac{\partial V}{\partial F} + V \cdot t_{\text{спо}} \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial F} &= 0, \\ (T_{\text{вд}}^2 + T_{\text{вд}} \cdot t_{\text{спо}}) \frac{\partial V}{\partial n} + V \cdot t_{\text{спо}} \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial n} &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Для незатупленого долота типу PDC відсутність зношування оснащення означає, що  $T_{\text{вд}} = \text{const}$ . Тоді

$$V t_{\text{спо}} \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial F} = 0 \text{ і } V t_{\text{спо}} \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial n} = 0$$

і розв'язок системи рівнянь (16) збігається з розв'язками систем (8) і (10).

Отже максимум рейсової швидкості проходки у процесі буріння долотами типу PDC збігається з максимумами механічної швидкості проходки і проходки на долото.

Окрім того, розглянемо критерій собівартості метра проходки

$$C = \frac{B_{\text{г}}(T_{\text{вд}} + t_{\text{спо}}) + B_{\text{д}}}{h}, \quad (17)$$

де:  $B_{\text{г}}$  – вартість однієї години роботи бурової установки без урахування вартості долота,

$B_{\text{д}}$  – вартість долота.

Умови існування мінімуму собівартості метра проходки свердловини долотом типу PDC дають таку систему рівнянь [5]:

$$\begin{aligned} T_{\text{вд}}(T_{\text{вд}} B_{\text{г}} + t_{\text{спо}} B_{\text{г}} + B_{\text{д}}) \frac{\partial V}{\partial F} &= \\ &= -(B_{\text{г}} t_{\text{спо}} + B_{\text{д}}) \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial F}, \\ T_{\text{вд}}(T_{\text{вд}} B_{\text{г}} + t_{\text{спо}} B_{\text{г}} + B_{\text{д}}) \frac{\partial V}{\partial n} &= \\ &= -(B_{\text{г}} t_{\text{спо}} + B_{\text{д}}) \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial n}. \end{aligned} \quad (18)$$

Очевидно, що для незатупленого долота типу PDC відсутність зношування оснащення означає, що функція зношування не змінюється, і праві частини системи рівнянь (18) дорівнюють нулеві. Тоді система рівнянь (18) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} T_{\text{вд}}(T_{\text{вд}} B_{\text{г}} + t_{\text{спо}} B_{\text{г}} + B_{\text{д}}) \frac{\partial V}{\partial F} &= 0, \\ T_{\text{вд}}(T_{\text{вд}} B_{\text{г}} + t_{\text{спо}} B_{\text{г}} + B_{\text{д}}) \frac{\partial V}{\partial n} &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Бачимо, що розв'язок системи рівнянь (19) збігається з розв'язком систем (8), (10) і (16). Отже за відсутності зношування долота усі оптимальні режими буріння збігаються. Це означає, що статична оптимізація процесу буріння свердловини долотами типу PDC може бути реалізована на базі одного із критеріїв

$$h_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee V_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max, \quad (20)$$

$\max \vee V_p(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee C(x) \xrightarrow{x \in S} \min, x \in S$  які є мультиколінеарними.

Якщо ж функція зношування долота не є постійною величиною, тобто спостерігається зношування долота (що відбувається під час

використання шарошкових доліт), то тоді значення екстремумів проходки, механічної швидкості проходки, рейсової швидкості і собівартості метра проходки не співпадають.

Проте, якщо поділити перше рівняння системи (18) на друге і, таку ж процедуру виконати для систем рівнянь (8), (10) і (16), то отримаємо рівняння [5] оптимальності

$$\frac{\partial V}{\partial F} \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial n} - \frac{\partial T_{\text{вд}}}{\partial F} \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \quad (21)$$

яке рівняння в площині параметрів  $F$  і  $n$  зображає деяку лінію, на якій розташовані усі оптимальні режими буріння.

### Висновок

Аналіз критеріїв оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами типу PDC довів, що за умови відсутності зношування оснащення долота усі оптимальні режими буріння збігаються. Це означає, що статична оптимізація процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами типу PDC може бути реалізована на базі будь-якого критерію оптимальності: максимуму проходки на долото, максимуму механічної швидкості проходки, максимуму рейсової швидкості проходки, або мінімуму собівартості метра проходки, оскільки усі вони мультиколінеарні. Перевагу слід надати максимуму механічної швидкості проходки.

### Література

- 1 Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003 – 493 с.
- 2 Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі: [навчальний посібник] / М.А.Мислюк, Ю.О.Зарубін. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 496 с.
- 3 Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу / О.Т.Драганчук, Т.О.Пригоровська // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №4. – С.11-15.
- 4 Бондаренко Н.А. Исследование износа алмазных буровых долот. Ч.Уравнение изнашивания / Н.А.Бондаренко, А.Н. Жуковский, В.А.Мечник // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2006, №4(21). – С.16-19.
- 5 Ситников Н.Б. Влияние износа породоразрушающего инструмента на оптимальные значения режимных параметров при алмазном бурении скважин / Н.Б.Ситников // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – №9. – С.67-70.
- 6 Пат. 2174596 Российская Федерация. МПК 7E21B44/00. Способ регулирования условий бурения, влияющих на режим эксплуатации бура / Смит Ли Морган (US), Голдман Виллям Э. (US); заявитель и патентообладатель Дроссер Индастриз, ИНК. (US). – №98 11 9444/03; заявл. 1997.03.21; опубл. 2001.10.10.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
04.03.10

Рекомендована до друку професором  
Г.Н. Семеновим